

室温硫化硅橡胶及其在航天器上的应用

邱明伟 张丽新 何世禹 杨德庄

(哈尔滨工业大学空间材料与环境工程实验室, 哈尔滨 150001)

文 摘 概述了室温硫化硅橡胶的类型、硫化机理及其研究进展, 阐述了空间级硅橡胶的制备以及硅橡胶与空间环境的交互作用, 介绍了室温硫化硅橡胶在航天器太阳能电池、热控涂层及舱体密封上的应用, 并提出了今后空间级硅橡胶的主要研究方向。

关键词 室温硫化硅橡胶, 航天器, 空间环境

RTV Silicone Rubber and Its Application in Spacecraft

Di Mingwei Zhang Lixin He Shiyu Yang Dezhuang

(Space Materials and Environment Engineering Laboratory, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract The type and vulcanization mechanism of room temperature vulcanized silicone rubber and the advance in the research on silicone rubber are summarized. The preparation of space grade silicone rubber and the action between silicone rubber and space environment are also expatiated. The application of room temperature vulcanized silicone rubber in solar cell, thermal control coatings and sealing in spacecraft is introduced, and the research aspect of space grade silicone rubber is also proposed.

Key words RTV silicone rubber, Spacecraft, Space environment

1 前言

硅橡胶是聚硅氧烷最重要的产品之一。硫化前为高摩尔质量的线型聚硅氧烷, 硫化后成为网状结构的弹性体。它具有优异的耐高低温、耐候、耐臭氧、抗电弧、电气绝缘性、耐化学品、高透气性及生理惰性性能, 因而在航空、航天、电气电子、化工仪表、汽车、机械等工业以及医疗卫生、日常生活的各个领域得到了广泛的应用^[1]。特别是在航天领域, 由于有机硅材料良好的耐高低温、耐紫外线、耐辐照、绝缘、透光率高等性能, 被认为是最理想的空间材料。空间级硅橡胶主要应用在太阳能电池的粘接、航天器表面热控涂层及航天器舱体的密封等方面。

2 室温硫化硅橡胶的种类

室温硫化硅橡胶是以黏度较低的聚硅氧烷为聚合物, 在室温下通过与湿气或与交联剂混匀, 即可硫化成弹性体。室温硫化硅橡胶具有硫化温度低、硫化速度快、易于操作等特点, 因而应用较广。按照硫化机理, 可分为缩合型和加成型两种。

2.1 缩合型室温硫化硅橡胶

缩合型室温硫化硅橡胶是以端羟基聚硅氧烷为基础聚合物, 多官能硅烷或硅氧烷为交联剂, 混以催化剂、填料及其他添加剂而成。在锡类等催化剂作用下, 室温遇到湿气或混匀即可发生缩合反应, 形成三维网状弹性体。按包装形式可分为单组分型和双组分型。缩合型硅橡胶的硫化机理如图 1 所示^[2]。

一般的缩合型室温硫化硅橡胶在交联剂、催化剂和微量水存在下才能硫化, 而残余的催化剂以及

收稿日期: 2004 - 05 - 14

作者简介: 邱明伟, 1972年出生, 博士研究生, 主要从事胶黏剂及空间胶接材料等方面的研究工作

宇航材料工艺 2005年 第4期

— 7 —

硫化反应的副产物在高温下能引起或促使硅氧主链发生解扣式降解^[3],使硅橡胶性能下降。为提高缩合型室温硫化硅橡胶的力学性能和热稳定性,通常对填料进行表面处理^[4]以及提高交联密度或在硅橡胶中添加热稳定剂如氧化铁^[5]、双马来酰亚胺^[6~7]、硅氮化合物^[8]来改善硅橡胶的热稳定性。除此之外,根据某些结构的硅氮聚合物易与室温硫

化硅橡胶的硅羟基反应的特点,谢择民等^[9~11]发明了一种硅氮聚合物 KH-CL 用作交联剂,它可以在室温没有催化剂的存在下和硅氧链末端的硅羟基脱氢产生交联,过量的 KH-CL 交联剂在高温时还能消除体系中的硅羟基和水,因此得到的硫化物热稳定性大幅度提高。

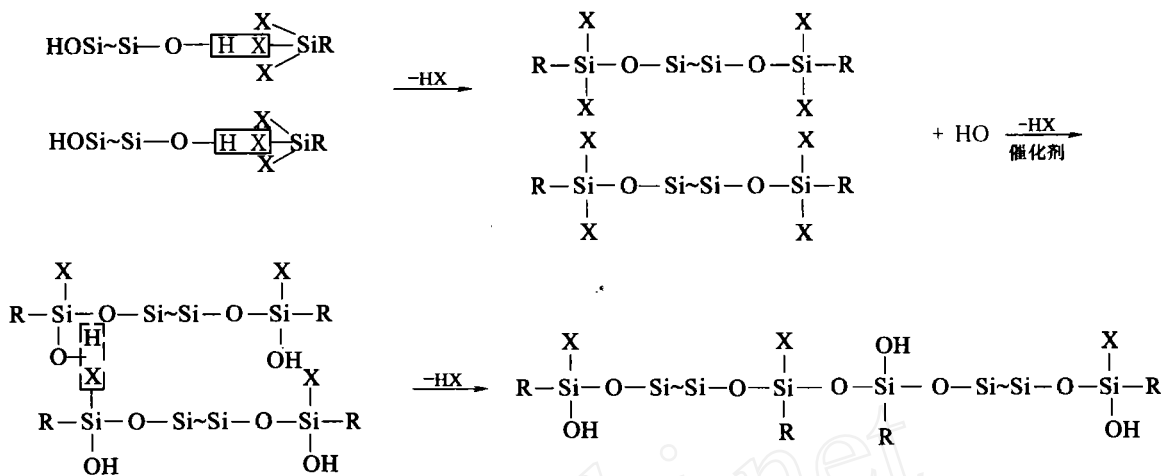
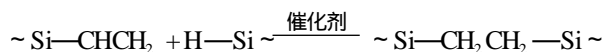


图 1 缩合型硅橡胶的硫化机理^[2]

Fig 1 Vulcanization mechanism of condensation type silicone rubber

2.2 加成型室温硫化硅橡胶

加成型硅橡胶是以含乙烯基的有机聚硅氧烷作为基础聚合物,与含硅氢键的有机聚合硅氧烷,在铂催化剂存在下进行硅氢加成反应。固化机理如下^[2]:



与缩合型硅橡胶相比,加成型硅橡胶硫化过程不产生副产物,收缩率极小,且透明性好,强度高,在高温下的密封性比缩合型好。两类硅橡胶的特点和性能对比如表 1 所示^[2]。

表 1 缩合型与加成型硅橡胶的性能及特点对比

Tab 1 Characteristics and properties of condensation type and addition type silicone rubber

| 橡胶种类 | 合成方法特点 | 工艺性能 | 硫化副产物 | 密封状态下的耐热性 | 介电性能 | 粘接强度 | 光学性能 | 线收缩率 / % |
|------|-----------|----------------|--------|------------|--------------|--------|------------|----------|
| 缩合型 | 工艺简单,成本低 | 可操作时间短,大面积施工难 | 醇、水等 | 易老化,失去力学性能 | 硫化初始阶段介电性能降低 | 中等 | 一般不能用于光学制品 | 0.1~0.8 |
| 加成型 | 工艺复杂,成本较高 | 操作时间长,可大面积连续施工 | 无反应副产物 | 良好 | 良好 | 可获得高强度 | 透过率大于 90% | <0.1 |

加成型硅橡胶在使用时不能接触含有 N、P、S 等元素的有机物, Sn、Pb、Hg、Bi、Ag 等重金属的离子性化合物及含炔基等不饱和键的有机化合物,如有机

橡胶(含硫及防老剂)、环氧树脂(含胺固化剂)、缩合型室温硫化硅橡胶(含有机锡催化剂、硅氮交联剂)等,这些都会使铂催化剂中毒失去催化能力。

鉴于乙烯基加成型硅橡胶和其他材料的粘接力差,并且固化所用的铂催化剂极易中毒失效,因此以-双(甲基二烯丙基硅基)聚二甲基硅氧烷代替乙烯基聚硅氧烷,制成加成型硅橡胶。由于烯丙基的存在,使其固化后对多种材料具有较好的粘接性能,并且由于烯丙基对硅氢加成反应具有较大的活性,所以交联固化过程不易受到外来杂质的干扰^[12]。

3 空间级有机硅橡胶的特点

3.1 空间环境的特点

航天器常用的轨道有低地球轨道(200~500 km)和地球同步轨道(36 000 km),不同轨道的空间环境各有其特点。低地球轨道的粒子密度为 $7.5 \times 10^9 / \text{cm}^3$ (200 km处)~ $1.0 \times 10^7 / \text{cm}^3$ (500 km处),50%~90%的粒子是处于中性基态的原子氧,在此轨道上航天器受原子氧冲击表面的能量约为5 eV。这种高能粒子流足以使卫星材料中的许多化学键破裂,低地球轨道环境中也有陨石和空间碎片,典型的直径为1~0.01 mm,还有电子和质子。在此轨道辐照期间,材料经受带电粒子辐照,年吸收剂量约为1 kGy,其粒子能量为1~2 MeV。基本的电磁辐射是太阳紫外光谱,波长为100~150 nm,通量为 $4 \times 10^{11} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,在此轨道上运行30年的星体由照射区(+120°)到阴影区(-160°)的交变过程要重复 1.7×10^4 次之多,这种快速的温度交变会在结构中产生较高的热应力。在地球同步轨道,一颗运行25~30年的航天器所接受的电磁辐射剂量可达10~100 MGy^[13-15]。

3.2 空间级硅橡胶的性能要求

硅橡胶具有优良的耐高低温性能、良好的电气性能和耐辐照性能,基本能够满足空间环境的恶劣条件。但是空间环境的特点给胶接材料提出了新问题,其中最突出的是在真空及高低温交变协同作用下的热真空出气问题。由于硅橡胶在硫化过程中产生的副产物及少量未反应的低分子量物质,在真空条件下,会从材料中逸出,而凝集于附近的冷表面上,造成污染,如凝集于光学镜头表面,会改变其透光率;凝集于温控器和电接头表面,会改变接触电阻;凝集于热控涂层表面,会改变吸收率—辐射率比值。因此对于空间材料提出了热真空脱气性能指标,如美国的NASA和欧洲ESA一般要求空间材料宇航材料工艺 2005年 第4期

在 $125 \sim 1.3 \times 10^{-4}$ Pa环境下,24 h材料总失重不大于1%,25℃收集面上的可凝性挥发成分不大于0.1%^[16]。

3.3 空间级硅橡胶的处理方法

为了使硅橡胶的热真空脱气性能符合空间级材料的要求,一般对硅橡胶生胶进行预处理,以减少其挥发组分。对生胶的预处理大体上有热真空处理法和液-液提馏两种方法。

3.3.1 热真空处理法^[17-18]

将生胶在一定温度和高真空条件下进行一定时间的预处理,以除去生胶中的小分子物质。在处理中,升高温度、提高真空度及延长处理时间都有利于小分子物质的去除。

3.3.2 液-液提馏处理法^[18-19]

选取适当的混合溶剂,连续提馏生胶中的小分子物质,以减小热真空下的质量损失。对于室温或低温硫化硅橡胶来说,用液-液提馏处理生胶具有更重要的意义。

3.4 硅橡胶与空间环境的交互作用

航天器在轨飞行期间,反复进出地球阴影,环境温度交替变化,其表面温度一般在172~366 K变化;同时还要受到质子、电子等高能粒子的辐照作用。这些因素都会加速硅橡胶等高分子材料的老化,导致其质损率上升,性能下降^[20-21]。航天器在轨飞行期间所承受的带电粒子的通量一般小于 $10^8 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,尽管这一通量对多数材料的损伤不大,但随航天器寿命的延长,辐照累积效应对材料的损伤作用不容忽视。

张丽新等^[22-25]研究了在空间环境下真空热循环和质子辐照对硅橡胶的损伤行为。在循环温度场作用下,硅橡胶材料的质损率随循环次数上升而增加,并趋于平缓;室温及高温拉伸强度随热循环次数增加先提高,而后下降;热循环过程中硅橡胶会产生应变滞后现象。硅橡胶在质子辐照剂量较小时以辐照交联效应为主,剂量较大时降解效应占优势。

谭必恩等^[26]考察了加成型硅橡胶在真空环境中紫外辐照后的光学性能变化。结果表明,辐照后材料出现发黄的现象,光学透过率大幅度下降。

Millinchuk^[27]研究发现,硅橡胶在-196~250℃,经一定次数的热循环后,拉伸强度显著下降,表面出现老化龟裂条纹。

20世纪80年代以来,美、德等国对辐照场中不同辐照源及剂量对硅橡胶的影响进行了研究^[28-29]。北京大学物理系和重离子物理研究所^[30]使用 Si^+ 和 F^+ 轰击医用硅橡胶等材料,研究了它们的氧化行为。中国工程物理研究所对开孔型的硅橡胶泡沫在中子和 ^{60}Co 及 γ 射线辐照下的行为作了较为细致的研究^[31]。目前有关高分子结构与辐照稳定性的关系,还只能做定性描述。

4 室温硫化硅橡胶在航天器上的应用

4.1 太阳能电池

太阳能电池片若直接暴露于空间,会受到原子氧、带电粒子、紫外线、温度交变等空间环境因素的作用,导致光电转换机能衰减。因此需采用透明、耐辐射、黏性好及能承受空间环境因素作用的黏接剂将硅晶片封装,并和上层防护玻璃、下层材料(常为聚酰亚胺薄膜)黏合为一体,构成太阳能电池板^[32]。

国外从20世纪60年代就已开始使用硅橡胶作为太阳能电池的黏接剂。目前国际上公认的空间级硅橡胶黏接剂是美国的DC-93500及德国的RTV-S691和RTV-S695。经地面模拟和空间搭载实验表明,它们的综合性能好,但其组成及制备工艺未见报道^[33-34]。我国自行研制的硅橡胶黏接剂也已成功应用于卫星太阳能电池的粘接中^[35-38]。

4.2 热控涂层

热控涂层是航天器(包括卫星、空间站和航天飞机)热控系统的重要组成部分,其原理是调节物体表面的太阳吸收率(α)和红外辐射率(ϵ)来控制物体的热量平衡。几乎每一个航天器外表面均需涂覆热控涂层,以保障星体安全和星内仪器的正常工作。有机型热控涂层的 α/ϵ 值易调节,柔韧性好,耐高低温,抗冲击性能好,是不可替代的热控涂层。有机硅热控涂层由黏料和颜料两部分组成,黏料多采用甲基型有机硅,硫化方式为缩合硫化。近年来人们已越来越认识到热控涂层的质量损失(TML)和可凝挥发物(CVCM)两项指标的重要性。而加成型有机硅可深层硫化,硫化过程中无小分子放出,涂层的抗收缩性好。可望用加成型有机硅制得高性能航天器用热控涂层。

有机型热控涂层有白色和黑色两种。目前俄罗斯的白色和黑色有机热控涂层^[39]所用的树脂主要是丙烯酸树脂和有机硅类,白色颜料有 ZnO 、 TiO_2 和

ZnO_2 ,黑色颜料主要为 Co_2O_3 、炭黑等。我国和美国目前主要用 ZnO 。我国采用的白色热控涂层主要有S956、SR107、S781等品种^[40]。它们都是由硅橡胶或硅树脂和 ZnO 配制而成。近年来国内研究人员也研究了新型的热控涂层,如加成型硅橡胶热控涂层^[41]及抗静电白色热控涂层ACR-1^[42]。

4.3 舱体密封

航天器上宇航员的座舱、工作舱都必须是密封的,常用的密封材料为有机硅橡胶。国产414型高强度单组分室温硫化硅橡胶粘接铝合金的拉伸强度可达2.3 MPa,可在 $-160\sim 300$ 下长期使用,已用于宇宙飞船观察窗、宇航员座舱口及飞机门窗的密封黏合^[43]。

空间环境中复杂的环境因素会直接影响到密封材料的性能,甚至使密封失效。硅橡胶的高低温性能优异,温度不低于 -120 时有优异的弹性。但低于 -120 时,材料明显变脆,作为密封材料就会完全失效。此外硅橡胶的低温收缩也可引起密封失效,特别是在 $-60\sim -70$ 收缩量明显增大,这将使原来可靠的密封失效。高温下材料失效的原因是材料的热失重和高温老化。硅橡胶密封材料在高真空环境下,由于硅橡胶内的挥发组分迅速挥发,引起力学性能的下降,造成硅橡胶变硬、变脆,从而使密封失效。粒子辐照也会造成硅橡胶强度下降、压缩变形量减小、伸长率降低、硬度增大,这些都会使材料的密封性下降^[44]。作为密封使用的硅橡胶垫圈的压缩变形对温度很敏感,随着温度的升高,硅橡胶的压缩变形增大,很快失去密封性能。通过改变 SiO_2 的用量或使用添加剂的方法可以改进硅橡胶的抗压缩变形性,王金亭等^[45]采用六苯基环三硅氮烷作为添加剂,使其在250下的抗压缩变形性能大大提高。

由此可见,硅橡胶密封材料的选择要充分考虑到这些因素,并且要考虑多种环境因素的协同作用。

5 发展趋势

5.1 研制新型空间级硅橡胶

可以利用纳米粒子的特殊结构改性硅橡胶,在改善力学性能的同时,提高硅橡胶的抗辐照性能。这方面研究目前在理论上还不成熟,制备技术还不完善,对复合机理、结构及其与性能的关系等方面还有待进一步探索。其中原位纳米复合技术具有高分

散性、可设计性(物理化学结构、界面、形状、尺寸及其分布等),是硅橡胶增强技术的发展方向。

5.2 进一步研究材料与空间环境的交互作用

空间环境下胶接材料及胶接结构的可靠性与寿命很大程度上取决于胶接材料与空间环境的交互作用。目前来看,世界上的航天大国在这一领域均开展了研究,我国这方面的研究还很少。研究材料与空间环境的交互作用,对建立材料在空间环境下性能退化数据库,研制新型空间胶接材料,延长航天器的在轨运行寿命具有重要的现实意义。

参考文献

- 1 幸松民,王一璐.有机硅合成工艺及产品应用.北京:化学工业出版社,2000:536
- 2 周宁琳.有机硅聚合物导论.北京:科学出版社,2000:112~145
- 3 Zeldin M. Kinetics of thermal depolymerization of trimethylsilyloxy end-blocked polydimethyl-siloxane and polydimethyl-siloxane N-phenylsilylazane copolymer. *J. Polym. Sci. Chem.*, 1986; 24(6):1085
- 4 郑俊萍,苏正涛,潘大海等.白炭黑对硅橡胶耐热性能的影响. *橡胶工业*, 1997; 44(8):17~19
- 5 苏正涛.耐热添加剂对硅橡胶硫化胶耐热老化性能的影响. *橡胶工业*, 1999; 46(1):15~17
- 6 周重光,贝小来,周长忍等.双马来酰亚胺改进硅橡胶耐热性能的研究. *合成橡胶工业*, 1990; 13(1):17
- 7 周重光,贝小来,周长忍.双马来酰亚胺在改进硅橡胶热稳定性中的作用. *高分子学报*, 1991; (1):26
- 8 谢择民,王金亭,李其山等.硅氮化合物在改进聚硅氧烷热稳定性中的作用. *高分子学报*, 1989; (1):46
- 9 谢择民,王清正,王金亭等.高耐温(350)室温硫化硅橡胶. CN. 93117927, 1993
- 10 谢择民,王清正,王金亭等.硅氮聚合物及其合成方法及用途. CN. 93117929, 1993
- 11 王清正,谢择民,王金亭等.硅氮化合物交联的缩合型双组分室温硫化硅橡胶的热稳定性. *合成橡胶工业*, 1993; 16(4):230
- 12 杨维生,毛晓丽.一种烯丙基硅基封端的聚二甲基硅氧烷的研究. *粘接*, 1993; 14(3):5
- 13 Leger L, Visentine J, Sautomason B. Selected materials issues associated with space station. *The SAMPE Journal*, 1987; 18(2):48
- 14 Louthan M R et al. Materials degradation in space environment. *AA Special Rep.*, 1980; (5):7
- 15 Stein B A. LDEF materials review, LDEF - 69 Months. *宇航材料工艺* 2005年 第4期

in space. NASA CP 3194:741~789

- 16 薛大同,张景钦.航天材料的真空性能. *中国国防科学技术报告*. GF - A0017381G, 1995
- 17 Seidenberg B J. Processing of space grade silicone rubber. US Pat 3733350, 1973
- 18 曹镛,胡春野,贝建中.空间级硅橡胶的研制. *特种橡胶制品*, 1981; (6):1
- 19 Guillaumon J C, Guillin J. Eval action environ spat. *Mater Colluq Int*, 1974:271
- 20 Salnikov V A, Berejnoj V M, Idkakov L I et al. Expert evaluation of possible damage of the optical surfaces of T - 170 space telescope induced by spacecraft materials and space environment. In: 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997:173~178
- 21 Schmitt D R, Ringel G, Kratz F et al. Degradation effects of optical components in the low orbit. In: 7th international symposium on materials in space environment, Toulouse, France, 1997:257~263
- 22 张丽新,杨士勤,何世禹.真空热循环对空间级缩合型硅橡胶拉伸性能的影响. *材料工程*, 2002; (4):12~14
- 23 张丽新,杨士勤,何世禹.质子辐照与热循环联合作用对空间级硅橡胶损伤效应的研究. *中国胶粘剂*, 2002; 11(3):7~10
- 24 张丽新,杨士勤,何世禹.质子辐照空间级硅橡胶的正电子湮没寿命谱研究. *强激光与粒子束*, 2002; 14(4):629~632
- 25 张丽新,杨士勤,何世禹.硅橡胶粘合剂在空间环境下的性能演变. *橡胶工业*, 2002; 49(8):503~507
- 26 谭必恩,尹朝晖,潘慧铭等.真空紫外辐照对加成型硅橡胶光学性能的影响. *功能高分子学报*, 2001; 14(4):432~436
- 27 Millinchuk A V. Sixth international symposium on materials in a space environment. ESTEC. Noordwijk, 1994:249~253
- 28 Badhwar G D, Oneill P M. Response of silicon-bases linear energy transfer spectrometers: Implication for radiation risk assessment in space flights. *Nuclear Instruments and Methods in Physics A*, 2001; (466):464~474
- 29 Gillen K T, Clough R L. Quantitative confirmation of diffusion-limited oxidation theories. *Polym. Prep.*, 1990; 31(2):337~341
- 30 Wang Ruiyu, Ha Hongfei, Wang Yugang et al. Study on oxidation of polymers treated by high let radiation. *Radiat Phys Chem.*, 1998; 52(2):251~256

(下转第 24 页)

18 Pan J et al An analysis for welding processing and properties of SiC/Al composites Pittsburgh, P A. In: MRS international meeting on advanced materials, 1st, Tokyo, Japan, Materials Research Society, 1998; A90 - 33959: 14 ~ 23

19 Wang H M, Chen Y L, Yu L G In-situ weld-alloying/laser beam welding of /6061AlMMC. Materials Science and Engineering, 2000; A293: 1 ~ 6

20 陈彦宾, 张德库, 牛济泰, 冀国娟. 激光焊接铝基复合材料钛的原位增强作用. 应用激光, 2002; 22 (3): 320 ~ 322, 338

21 陈永来, 于利根, 王华明. 合金化填充材料 Ni对 SiC_p/6061Al复合材料激光焊接焊缝显微组织的影响. 复合材料学报, 2000; 17 (4): 63 ~ 65

22 Warren R, Anderson C H. Silicon carbide fibers and their potential for use in composite materials, Part . Composites, 1984; 15: 101 ~ 111

23 Laurent V, Chatain D, Eustathopoulos N J. Wettability of SiC by aluminum and Al - Si alloys Mater Sci , 1987; 22 (1): 244 ~ 250

24 Hashin J, Looney L, Hashin M S J. The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy. Journal of Materials Pro-

cessing Technology, 2001; 119: 324 ~ 328

25 Murty B S, Thakur S K, Dhindaw B K. On the infiltration behavior of Al, Al - Li, and Mg melts through SiC_p bed. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000; 31A: 319 ~ 324

26 Pech-Canul M I, Katz R N, Makhlof M M. Optimum parameters for wetting silicon carbide by aluminum alloys Metallurgical and Materials Transactions A, 2000; 31A: 565 ~ 573

27 Kelly A, Mileiko S T. Handbook of Composites Vol 4. Elsevier Science Publishers, 1984

28 Laurent V, Chatain D, Eustathopoulos N. Wettability of SiO₂ and oxidized SiC by aluminum. Mater Sci Eng A, 1991; 135: 89 ~ 94

29 Jae-chul Lee, Jae-pyoung Ahn, Zhongliang Shi et al. Methodology to design the interfaces in SiC/Al composites Metallurgical, Materials Transactions A, 2001; 32A: 1 541 ~ 1 550

30 Jae-chul Lee, Jae-pyoung Ahn, Zhongliang Shi et al. Modification of the interfaces in SiC/Al composites Metallurgical and Materials Transactions A, 2000; 31A: 2 361 ~ 2 368

(编辑 吴坚)

(上接第 11 页)

31 黄玮, 傅依备, 王朝阳等. 甲基乙基硅橡胶泡沫的辐射效应. 辐射研究与辐射工艺学报, 2001; 19 (2): 99 ~ 104

32 张丽新, 刘海, 杨士勤等. 航天器太阳能电池用硅橡胶粘结剂的低温性能. 合成橡胶工业, 2002; 25 (1): 9 ~ 11

33 Pollard H E, Barton W R. Technical aspects of the intelsat V solar assay. Conference Record of the Sixteenth IEEE Photovoltaic Specialists Conference Moscow, 1982: 31 ~ 35

34 Koch J. RTV - S695 a new adhesive for solar cell cover-glasses. In: Proceeding of an international symposium on spacecraft materials in space environment, ESA - SP - 178, 1982: 3 ~ 7

35 郭勇, 杨立明. 空间级有机硅橡胶. 高分子通报, 2000; (2): 79 ~ 83

36 杨始燕, 汪倩, 谢择民. 空间级加成型室温硫化硅橡胶粘结剂的研究. 宇航材料工艺, 2000; 30 (1): 42 ~ 45

37 杨始燕, 谢择民. 系列空间级室温硫化硅橡胶. 有机硅材料, 2000; 14 (3): 3 ~ 6

38 杨始燕, 谢择民, 高伟等. 高性能多功能硅橡胶的研究. 橡胶工业, 2000; 47 (12): 716 ~ 719

39 曾一兵, 张廉正, 胡连成. 俄罗斯空间有机热控涂层发展的现状及动向. 宇航材料工艺, 1999; 29 (6): 57 ~ 59

40 江经善. 卫星控制技术. 北京: 宇航出版社, 1991: 147

41 谭必恩, 郝志永, 曾一兵等. 低太阳吸收率加成型有机硅热控涂层的研制. 中国空间科学技术, 2001; 21 (3): 16 ~ 22

42 曾一兵, 熊春晓, 王慧等. 防静电白色热控涂层的空间环境性能试验. 中国空间科学技术, 2002; 22 (2): 63 ~ 66

43 张开. 硅烷偶联剂对硅橡胶粘结性的影响. 粘合剂, 1991; (3): 2 ~ 6

44 吴国庭. 密封材料空间环境失效分析. 中国空间科学技术, 1997; 17 (6): 40 ~ 43

45 王金亭, 谢择民. 硅氮化合物对硅橡胶压缩变形的影响. 特种橡胶制品, 1981; (6): 17

(编辑 吴坚)